

鋼製ラーメン橋脚隅角部モデルの曲げおよび繰り返し強度特性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD-DEFLECTION BEHAVIOR OF STEEL BOX SECTION BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS UNDER STATIC AND REPEATED LOADING

青木徹彦^{*}、長谷川 桂^{**}、山田将樹^{***}

By Tetsuhiko AOKI, Katsura HASEGAWA and Masaki YAMADA

^{*} 正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科 (〒470-03 豊田市八草町)^{**} 正会員 瀧上工業(株) 技術部 (〒475 半田市神明町)^{***} 学生員 愛知工業大学大学院 修士課程 建設システム工学 (〒470-03 豊田市八草町)

An experiment on corner parts of steel rigid frame structures subjected to static and repeated loading is described. The tests are performed using L-shaped models with rectangular and circular cross section columns, respectively. Although yielding load of column flange near frame corner part is considered as the same for compression and tension loading, the large difference was found from the experiment because of local buckling of the column's inner flange of corner part. Better load-deformation relationship is observed for the circular column model than that for the rectangular column model.

Key Words : rigid frame, repeated loading, local buckling, absorbed energy, circular section column

1. はじめに

最近、地震力等が作用する薄肉鋼構造を対象とした鋼構造部材の繰り返し挙動に関する研究が注目されている。特に、構造物の局部的損傷は許すものの破壊しないだけの耐荷力を持たせるといふ耐震設計の観点から、強度面のみならず変形性能の面からの検討の必要性が指摘されている。

土木鋼構造物の基本的な強度特性については、従来から基本部材の極限強度に関する研究が活発に行われてきた。しかし、これらの研究のほとんどは静的耐荷力に関するものであり、地震力のような繰り返し荷重を受ける構造部材または構造物全体の変形性能については、ここ数年やっと研究が始まったばかりというのが現状である。

都市高架道路の橋脚構造として多用されている鋼製門形ラーメン橋脚は、地震動が設計震度以下であれば構造物は安全であるが、それ以上の巨大地震での安全性についての検討は十分にされていない。したがって、巨大地震においても崩壊することなく走行機能を確保するためには、まず、地震時に最も大きな断面力が作用する可能性があり、応力集中のような不明確な応力状態が発生しやすい隅角部の挙動について検討することが重要であると考えられる。

ラーメン隅角部に関する従来の研究 1)~9)のうち、中井、福岡ら¹⁾は shear lag と耐荷力に関する実験的研究を行い、変形能に及ぼすせん断パネル部の変形の影響を指摘している。酒造、事口ら²⁾は単調および繰り返し載荷実験を行い、隅角部パネルのせん断変形が卓越する場合、安定した変形性能を有すること、また隅角部パネルと一般部フランジ板の各々の崩壊形式の違いによる変形挙動を示した。また、黄、西村ら³⁾により行われた実験

では種々の材料、寸法パラメータを変化させた 20 体の試験体を用いて同様の耐震特性を実験的に調べ、また材料強度による変化を明らかにしている。

これらはいずれも矩形断面のはり一柱からなる隅角部について調べたものであるが、本研究ではほぼ同程度の断面性能を有する八角形、矩形、円形断面柱からなるラーメン隅角部の地震時強度特性の違いを明らかにする目的で行われた実験的研究の一環として、矩形および円形断面柱を有するラーメン隅角部の実験結果について述べたものである。したがって、本実験での同一断面形状供試体の寸法パラメータは限られたものとなっている。なお八角形断面柱隅角部についての詳細は文献 4)で述べており、本論文ではそこでの結果を引用する。円形断面柱を有する隅角部の実験的研究^{7), 8)}は比較的少なく、現時点で繰り返し載荷を行ったものは著者らの知る限り見ることはできない。

2. 実験計画および実験方法

2.1 実験計画

実験供試体の材質はすべて SS400 (鋼管は電縫鋼管 STK400)とし、はり、柱部が直角に交差する L 形の隅角部モデルとする。柱部により大きな軸力が作用するよう、柱の長さをはりの約 2 倍としている。柱断面は、矩形 (REC) 1 種、円形 (CIR) 1 種の 2 種とし、円形断面では、はり部材のウェブを柱部材表面に溶接したものを用意する。矩形断面柱の板厚はウェブが 6mm、フランジが 9mm で、円形断面柱の板厚は 9.5mm とする。矩形断面柱のフランジの幅厚比は $b/t = 44.4$ 、公称値を用いた幅厚比パラメータは $R = 0.79$ である。この値は実構造物で用いられる値¹⁰⁾としてはかなり大きな値であるが、文

献 4)の八角形断面部材(R=0.71)との比較のため、その値より約 0.1 大きく定めてある。円形断面柱の径厚比は $r/t = 29.4$ である。この値は以下のようにして選んだ。平板の幅厚比パラメータ R と円形パイプの径厚比との直接的比較は難しいが、パイプの無次元化局部座屈パラメータ $\alpha = (E/\sigma_y)/(t/2r)^{1.5}$ が Plantema の限界値 $\alpha = 8$ になるときの規準径厚比 $(r/t)_y$ は本試験体の引張り試験結果を用いれば 36.4 となる。 $(r/t)/(r/t)_y$ の値が矩形断面供試体の幅厚比パラメータ $R = 0.79$ に近い値となるよう、電縫鋼管のカタログから外径が 500mm に近い断面寸法を選んだ。このとき $(r/t)/(r/t)_y$ の値は 0.78 となった。実際の設計では断面積 A と断面 2 次モーメント I が重要となるが、両者の比を示すパラメータ $r = \sqrt{I/A}$ を参考までに比較すると矩形断面では 20.4、円形断面では 19.4 となる。供試体は Table 1 に示すように、静的圧縮および静的引張試験、繰返し載荷試験に各 1 体ずつ、合計 5 体、

いずれも溶接組立により製作したものを用意する。ただし円形断面柱供試体は静的引張載荷実験は行わない。Fig. 1 に各供試体の基本寸法を、Table 2 に各供試体の諸元を示す。

なお本研究では 3 種の異なった柱断面形の隅角部構造の変形挙動に注目しているため、また、矩形断面フランジの幅厚比パラメータ R が 0.79 とかなり大きく、この部分の局部座屈が先行する破壊モードを想定しているため、隅角部のせん断変形については特に注目していない。

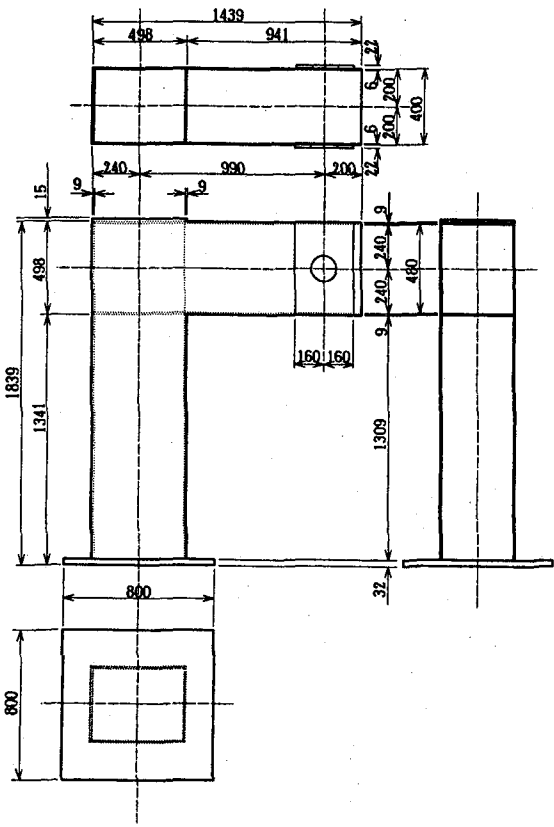
2.2 実験方法

(1) 素材引張試験

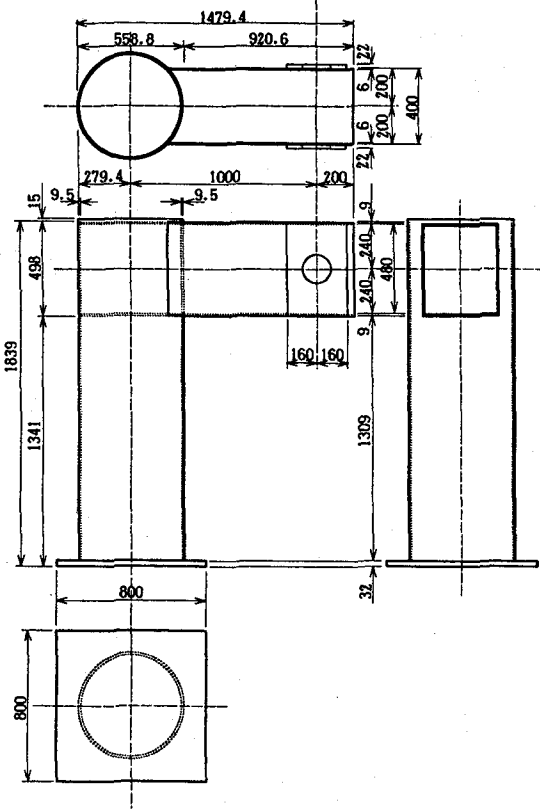
断面構成板と同じ材質で板厚 6mm、9mm および 9.5mm の JIS Z2201 号試験片を 6mm は 9 本、9mm は 6 本、9.5mm は 2 本製作し、引張試験を行う。

Table 1 Test Program

	Rectangular (REC)		Circular (CIR)	
Loading Method	Specimen Name	R	Specimen Name	r / t
Static Loading (Compression)	REC-C	0.79	CIR-C	29.4
Static Loading (Tension)	REC-T		—	
Repeated Loading	REC-R		CIR-R	



(a) Rectangular Section (REC)



(b) Circular Section (CIR)

Fig. 1 Dimension of the Test Specimen

Table 2 Properties of Test Specimens (Nominal)

Specimen	r (mm)	A _b (cm ²)	A _c (cm ²)	I _b (cm ⁴)	I _c (cm ⁴)	W _c (cm ³)	M _c (tf·m)	b/t	R	r/t
REC-C REC-T REC-R	—	129.6	129.6	54106	54106	2173	52.15	44.4	0.79	—
CIR-C	279.3	129.6	163.9	54106	61850	2214	53.14	—	—	29.4
CIR-R	279.3	305.6	163.9	127720	61850	2214	53.14	—	—	29.4

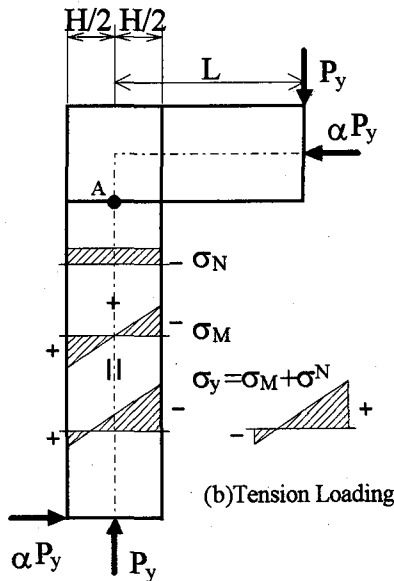
r : Outer Radius of Column Cross Section

A_b (A_c) : Area of Cross Section of Beam (Column)I_b (I_c) : Geometrical Moment of Inertia of Beam (Column)W_c : Modulus of Section of ColumnM_c : Yield Moment of Column

b/t : Width-Thickness Ratio

R : Dimensionless Width-Thickness Ratio

r/t : Radius-Thickness Ratio



(a) Compression Loading

Fig. 2 Calculation of Yield Strength P_y

(2) 降伏荷重の計算

予想降伏荷重 P_y は圧縮載荷と引張載荷ではともに Fig. 2 に示すように、隅角部内側の柱フランジを照査し、降伏応力 σ_y となる荷重より求める。まず、Fig. 2 の点 A に関する曲げモーメントを考える。すなわち、

$$M_y = P_y \left(L - \alpha \frac{H}{2} \right) \quad \dots (1)$$

ここに、 $\alpha = 990 / 1990 = 0.497$

これによる曲げ圧縮応力は、

$$\sigma_M = \frac{M_y}{I} \frac{H}{2} = \frac{P_y H}{2I} \left(L - \alpha \frac{H}{2} \right) \quad \dots (2)$$

これに軸力による応力 $\sigma_N = P_y/A$ を加えて、

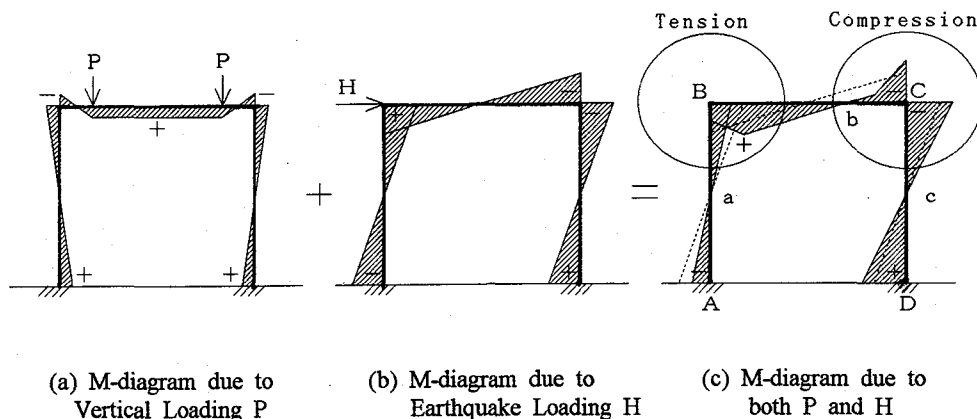
$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_M + \sigma_N \\ &= \frac{P_y}{A} \left[\frac{(L - \alpha H/2) A}{I} \frac{H}{2} + 1 \right] \quad \dots (3) \end{aligned}$$

上記のようにして求めた予想降伏荷重 P_y は、矩形断面柱モデル (REC)、円形断面柱モデル (CIR) でそれぞれ 60.3 tf, 96.5 tf である。

(3) 載荷実験

門形ラーメン橋脚の上載荷重と、地震力が水平に作用したとき、および両者の合成の曲げモーメント図の代表例を Fig. 3 (a),(b)および(c)に示す。左右からの水平力のくり返しによって、ラーメン隅角部には同図(c)の aBb または cCb のような曲げモーメントが発生する。このような応力状態は Fig. 4 に示すような L 型モデルの両端にくり返し力を与えることによってモデル化できる。

したがって本実験の隅角部モデルは、Fig. 4 に示すよ



(a) M-diagram due to Vertical Loading P

(b) M-diagram due to Earthquake Loading H

(c) M-diagram due to both P and H

Fig. 3 Modeling of a Frame Type Pier

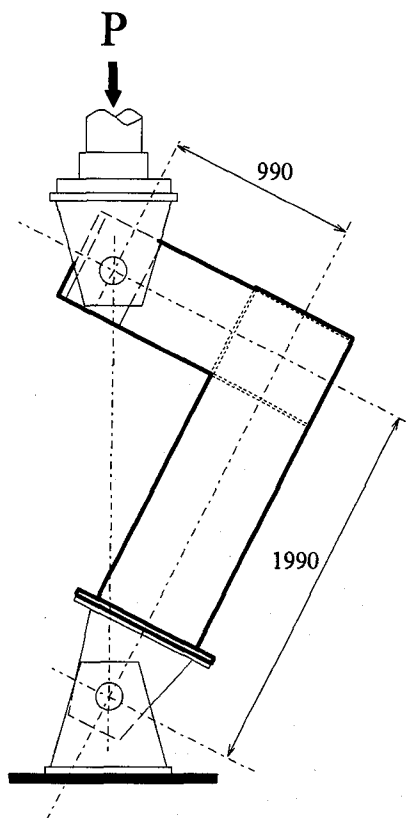


Fig. 4 Test Setup

うに、はり、柱部を $\phi 141\text{mm}$ のピンを通した回転支持とし、300 tf 長柱試験機を用いて載荷を行う。実験は柱断面が矩形、円形各 1 体に対して静的圧縮載荷実験、矩形 1 体に対して静的引張載荷実験、そして矩形、円形各 1 体に対して繰り返し載荷実験を行う (Table 1 参照)。

供試体には、隅角部付近の座屈変形が予想される部分にひずみゲージを貼付け、各荷重レベルごとに測定値を記録する。また、ピン支承間変位および隅角部の変形を調べるために変位形を設置し、各荷重レベルごとの変位を記録する。

(4) 静的載荷

圧縮または引張方向に予想降伏荷重 P_y まで 5 tf 刻みで荷重制御を行い、降伏荷重付近で変位制御にする。

(5) 繰り返し載荷

圧縮方向から載荷を始め変位制御で行う。載荷プログラムは文献 3) を参考にし、Fig. 5 に示すように、圧縮側のみ 3 サイクルごとに降伏変位 δ_y ずつピン支承間変位が進むように載荷し、最大荷重到達後は各サイクルともそのサイクルの最大荷重が供試体最大荷重の 1/2 に達するまで繰り返し載荷を行う。また、引張側は、繰り返しごとに变化させず、降伏変位 δ_y を強制変位として繰り返し載荷を行う。 δ_y は 1 サイクル目のラーメン隅角部最大ひずみ点のひずみが素材試験で得られた降伏ひずみ ε_y に達したときのピン支承間変位とする。なお、 δ_y は REC-R、

CIR-R に対してそれぞれ 12.1 mm, 11.2 mm となった。

3 実験結果および考察

3.1 素材引張試験

素材引張試験結果を Table 3 に示す。応力-ひずみ関係は、鋼管材 (電縫鋼管) から切り出した板厚 9.5mm のもののみ降伏点が明瞭とならない曲線になったため、残留ひずみが 0.2% になる応力度をもって耐力 (降伏点強度相当、0.2% Offset) とした。板厚が 6mm の試験片の降伏強度 σ_y は公称降伏強度より約 29% 高い値を示し、9mm では約 8%、鋼管材から切り出した 9.5mm では約 50% 高い値を示した。

3.2 残留応力測定結果

矩形断面柱の残留応力の測定結果は Fig. 6 に示す分布図となった。測定値は素材引張試験により得られた降伏応力で無次元化した。Fig. 6 に見られるように、溶接付近で引張残留応力があり、溶接から遠ざかるに従い圧縮残留応力 (最大値はフランジ部で $0.242\sigma_y$ 、ウェブ部で $0.327\sigma_y$) となるような分布を示している。これは、幅の広い薄板の端部を溶接した場合の一般的な残留応力分布形状と同様である。

3.3 静的載荷の最大荷重の比較

Table 4 に各供試体の最大荷重を示す。矩形断面柱供試体 (REC) では、静的圧縮載荷 (REC-C) より静的引張載荷 (REC-T) の方が約 31% 高い荷重となった。最大荷

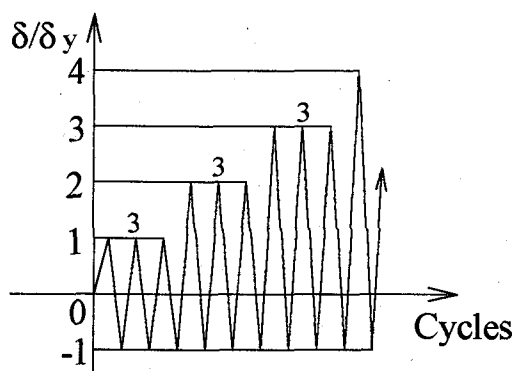


Fig. 5 Repeated Loading Program

Table 3 Test Results of Tensile Coupon Test

	E (kgf/cm ²)	σ_y (kgf/cm ²)	σ_u (kgf/cm ²)	ε_y (μ)	ν
t= 6mm	2.13 $\times 10^6$	3088	4293	1442	0.29
t= 9mm	2.11 $\times 10^6$	2599	4513	1218	0.29
t= 9.5mm	2.12 $\times 10^6$	3608	4762	1718	0.35

E: Young's Modulus σ_y : Yield Stress σ_u : Maximum Stress
 ε_y : Yield Strain ν : Poisson's Ratio

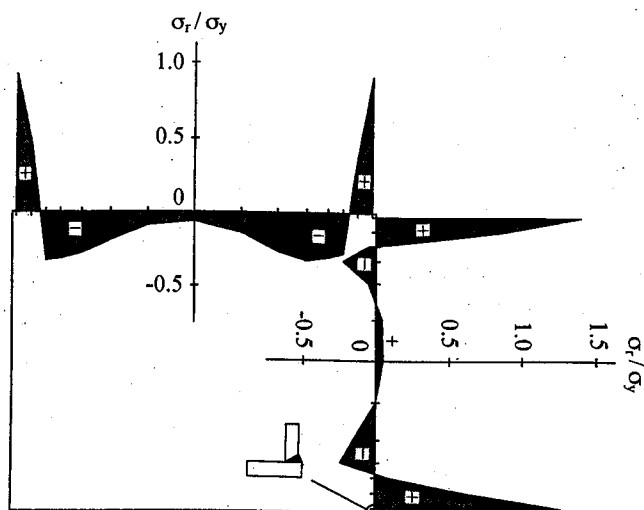


Fig. 6 Residual Stress Distribution of Rectangular Column

Table 4 Maximum Load for Static Loading

Specimen	P_u (tf)	P_y (tf)	P_u / P_y	δ_y (mm)
REC-C	66.9	60.3	1.11	8.72
REC-T	87.9	60.3	1.46	8.51
CIR-C	103.5	96.5	1.07	10.40

P_u : Maximum Load P_y : Expected Yield Load
 δ_y : Yield Displacement (Calculated)

重 P_u を予想降伏荷重 P_y で無次元化した結果、静的圧縮荷重の REC-C, CIR-C に対してはそれぞれ 1.11, 1.07 といずれも 1 割程度高い値となり、静的引張荷重の REC-T に対しては 1.46 とかなり高い値となった。これに対する考察は次項でまとめて述べる。

3.4 静的荷重の荷重-変位 ($P/P_y - \delta/\delta_y$) の関係

静的圧縮荷重および静的引張荷重の荷重 P 、変位 δ をそれぞれ降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_y で無次元化した $P/P_y - \delta/\delta_y$ の関係を Fig. 7 に示す。無次元化に用いる δ_y は計算値を用いたところ、実験で得られた弾性直線の傾きが約 10% 程度大きくなった。これは変位計の取り付けを Fig. 4 に示すようにピン中心にとっており、実験値にはピンと供試体との間の隙間の変化が加えられたものとなっていると考えられたため、正味の降伏変位 δ_y は実験による荷重-変位曲線の弾性部分の直線から予想降伏荷重 P_y に対応する値として求めた。

同図より、静的圧縮荷重を行った矩形断面柱の圧縮荷重 (REC-C) と引張荷重 (REC-T) を比較すると、曲線の形に大きな違いが見られた。すなわち、静的圧縮荷重を行った REC-C は隅角部内側フランジに応力が集中し早期に局部座屈を生じたため、最大荷重後の荷重が急激に低下したものと考えられる。本矩形断面供試体では実構造物で用いられるフランジ幅厚比パラメータよりかなり

大きく¹⁰⁾、これがもし 0.5 程度であれば文献 1), 3) にみられるように降伏後の強度上昇と伸び変形が期待できたと考えられる。一方、静的引張荷重を行った REC-T は緩やかな荷重上昇と荷重低下が見られた。これは、最大荷重に達する前に隅角部内側フランジが引張り降伏し、次いで背面圧縮フランジの降伏、せん断パネルの降伏によりピン支承間の伸び変形が生じると同時にひずみ硬化の影響により荷重が上昇したことによるもので、これらはひずみゲージの値から観察された。最大荷重点で隅角部外側圧縮フランジに座屈が生じたが、最大荷重点以降では隅角部内側フランジで受け持つ引張り荷重が大きいため [Fig. 2(b) 参照]、またパネルゾーンの塑性化により大きな変位が得られたと考えられる。隅角部に大きなせん断座屈変形が生じたのは最大荷重後、せん断パネルが全断面降伏後であった [Photo 1(b)]。

また、円形断面柱の圧縮荷重 (CIR-C) では、円形断面の柱部ではなく矩形断面のはり部が座屈したために矩形断面の柱部 (REC-C) にほぼ一致した荷重-変位特性が得られた。

Fig. 7 に破線で示した曲線は文献 4) の八角形断面柱を持つラーメン隅各部の実験結果である。OCT-I-T, OCT-O-T は引張り荷重を、OCT-I-C, OCT-O-C は圧縮荷重を示す。これらの断面構成板の幅厚比は $R=0.71$ である。これらを本研究での矩形断面部材での結果と比較すると、最大荷重は引張り荷重で約 8%、また圧縮荷重で約 13%、いずれも八角形断面部材が高い結果となった。これは構成板の幅厚比パラメータが 0.71 と矩形断面に比べ約 10% 小さかったためと考えられる。また圧縮荷重の場合、座屈発生後の荷重低下が八角形断面部材の方が緩やかであった。

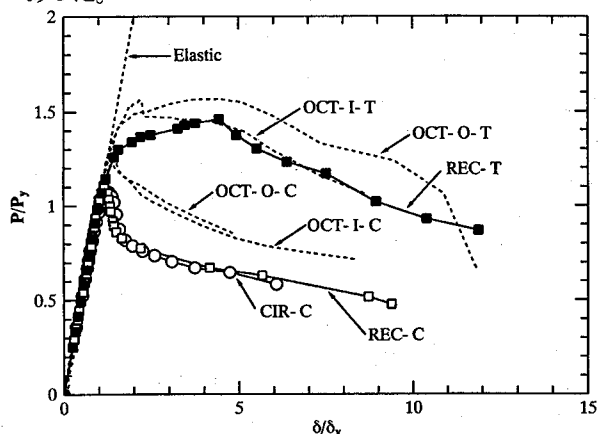


Fig. 7 Relation between Load and Displacement for Static Loading

3.5 柱フランジのひずみ分布

一般に、鋼製ラーメン橋脚隅角部には、はり柱の接合部付近のフランジプレートにせん断遅れ (Shear Lag) 現象が生じることが知られている¹¹⁾。Fig. 8 に示す柱フランジの水平線上に貼り付けたひずみ分布を REC-C につ

いて Fig. 9 に、REC-T について Fig. 10 に示す。

図中の横軸はひずみ $\varepsilon/\varepsilon_y$ 、縦軸はフランジの中心線を原点とするひずみゲージの位置 x/b を表す。また上下の図はそれぞれはりの割り込みフランジ位置より 0.05b (20mm)、および 0.5b (200mm) 下の水平線における分布図である。これらをそれぞれ A, B 線とする。

Fig. 9 より、REC-C のひずみ分布は、0.05b の A 線位置では柱内側フランジの最も外側 (中心線より 180mm) と中央部のひずみとの差は荷重の上昇とともに大きくなった。これは REC-T との比較よりせん断遅れの影響にしては大きすぎると考えられ、主に圧縮による局部座屈変形 (ゲージの位置での凹み) によるものと考えられる。B 線 (0.5b) の位置ではフランジ幅方向にほぼ一定の分布であった。また、柱外側フランジ (引張側) では、各線ともにフランジ幅方向にほぼ一定の分布であった。

Fig. 10 より、REC-T のひずみ分布は、A 線において柱内側引張フランジでは、フランジ中心部でのひずみが荷重レベル $P/P_y = 0.8, 1.0$ で明らかに両端部で増大しており、せん断遅れ現象が見られる。またひずみも降伏ひずみの 2-3 倍に達している

。フランジ中央部のひずみは REC-C の場合の約 2 倍になり、柱の外側圧縮フランジでは、REC-C と同様、各面ともにフランジ幅方向にほぼ一定の分布であった。

なお、REC-C も REC-T も最大荷重に達する前にせん断パネル部全体に降伏すべり線の発生がみられた。

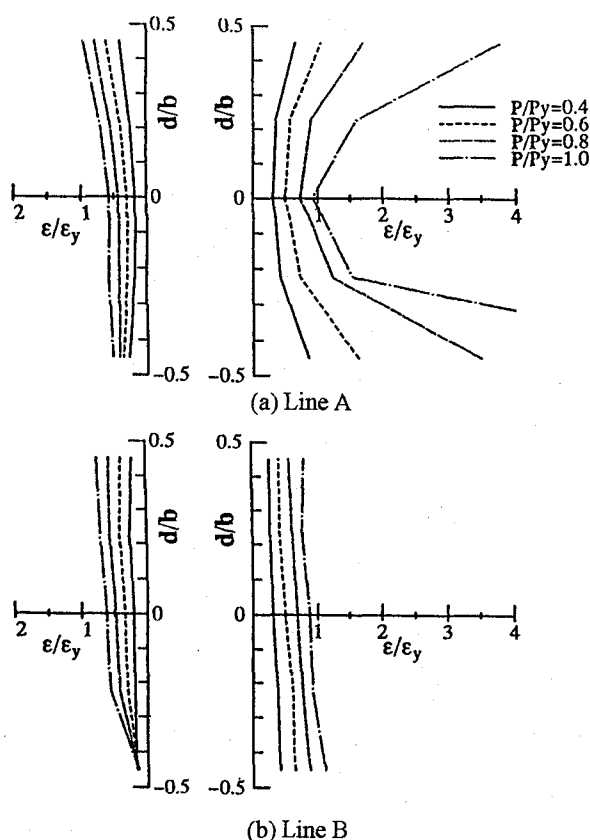


Fig. 9 Strain Distribution on the Transversal Line of Column Flange (REC-C)

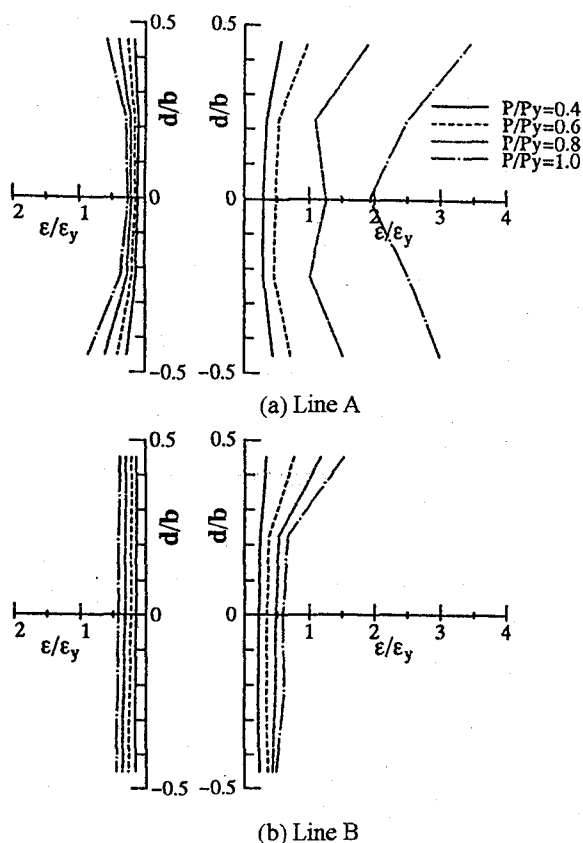


Fig. 10 Strain Distribution on the Transversal Line of Column Flange (REC-T)

3.6 座屈変形状態

REC-C は、最大荷重以降、柱の圧縮フランジに局部的な座屈が見られた [Photo 1(a)]。一方、REC-T は、はじめに背面フランジに局部座屈を生じた後、隅角部に大きなせん断座屈を生じた [Photo 1(b)]。REC-R は、REC-C と同様に柱部の圧縮フランジに局部的な座屈が生じ [Photo 1(c)]、最終的に溶接部分が破断した。

CIR-C は、はり部の圧縮フランジに局部的な座屈が見られた [Photo 1(d)]。一方、CIR-R は、はりの真下の柱部に局部的な座屈を生じ、最終的にはりと柱の溶接部分が破断した [Photo 1(e)]。

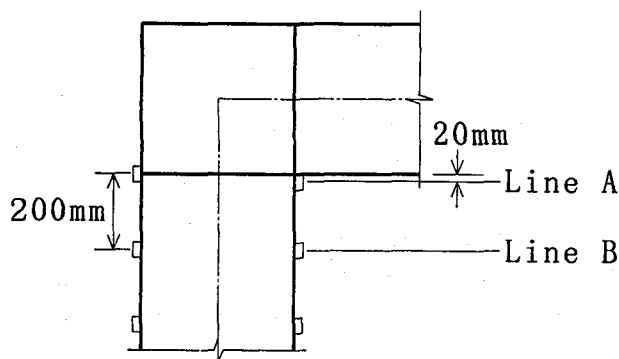
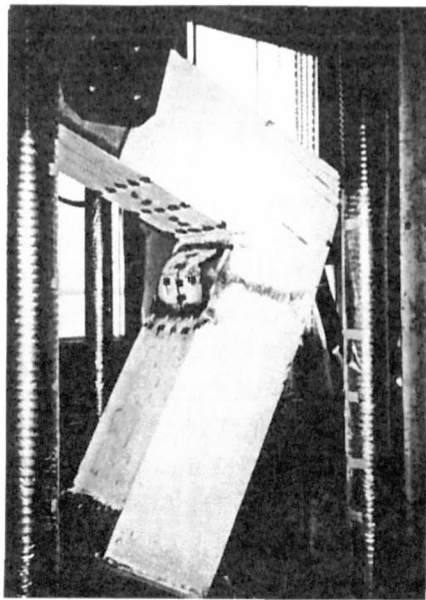
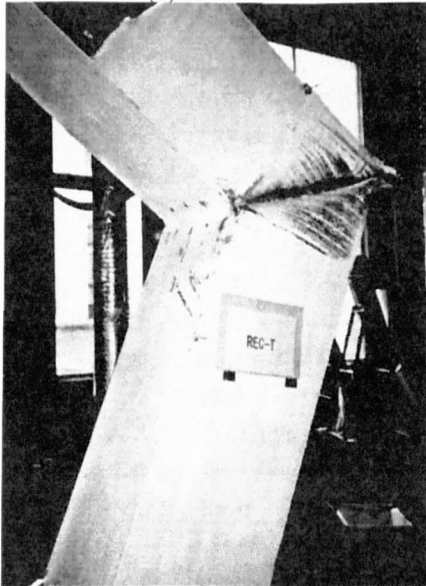


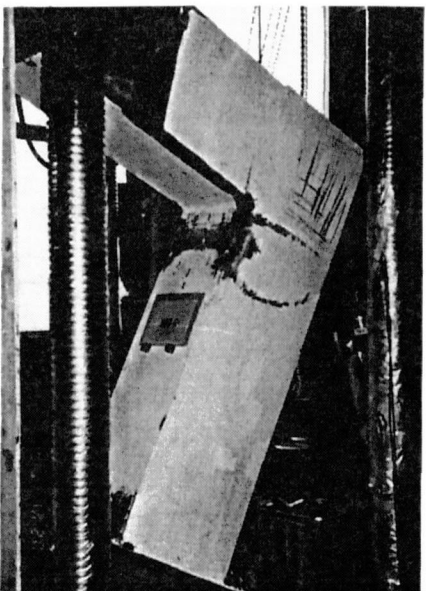
Fig. 8 Location of Strain Gages on Flange



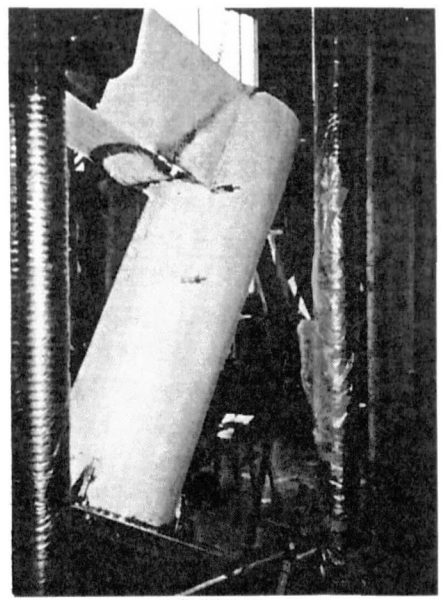
(a) REC-C



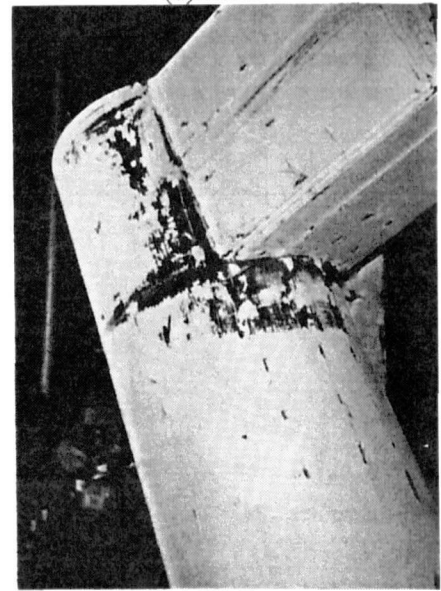
(b) REC-T



(c) REC-R



(d) CIR-C



(e) CIR-R

Photo 1 Buckling Configuration after Test

3.7 繰り返し載荷の荷重-変位 ($P/P_y - \delta/\delta_y$) の関係

繰り返し載荷を行った REC-R, CIR-R の $P/P_y - \delta/\delta_y$ 関係をそれぞれ Fig. 11 (a), (b) に示し、最大荷重を Table 5 に示す。図中には、それぞれ静的載荷実験結果 (REC-C, CIR-C) の関係を破線で示す。

矩形断面柱 (REC-R) の繰り返し載荷では、圧縮載荷の 1 サイクル目と静的圧縮載荷の最大荷重と同じ荷重になり、4 サイクル目に静的最大荷重の約 1.2 倍の最大荷重 (80.5tf) を得た。これは、圧縮載荷時に内側フランジに早期に座屈が生じたものの、引張載荷時に圧縮座屈変形がもとに戻され、またひずみ硬化の影響などによって強度が上昇したことが原因であると考えられる。なお、繰り返し載荷は 9 サイクル目で柱の隅角部付近のフランジとウェブの溶接割れが生じて終了した。

円形断面柱 (CIR-R) では、静的載荷実験ではり部の方

が早く座屈したために、繰返し载荷供試体でははり部に板を溶接し鋼管部より強くした後、繰返し载荷を行った。Fig. 11 (b) に示すように、矩形断面柱 (REC-R) に比べて繰返し载荷による耐力の低下は緩やかで、若干ねばり強い変形特性が見られた。最大荷重は 6 サイクル目に現れ、矩形断面柱 (REC-R) の約 1.6 倍 (126.5tf) を得た。なお、繰返し载荷は 18 サイクル目ではりと柱の接合部の溶接割れが生じて終了した。最後の 3 サイクルでは特に引張り側の変位が右に大きくドリフトしているが、これによる影響は、ドリフトしない場合に比べ変形能が若干右へ大きく現れているとみることができる。

最大荷重は、CIR-R の方が REC-R より約 57% 大きく、

Table 5 Maximum Load for Repeated Loading

Specimen	P_u (tf)	P_y (tf)	P_u / P_y	P_u / A (kgf / cm ²)
REC-R	80.5	60.3	1.33	621
CIR-R	126.5	96.5	1.31	772

P_u : Maximum Load P_y : Expected Yield Load
A : Cross Sectional Area of Column

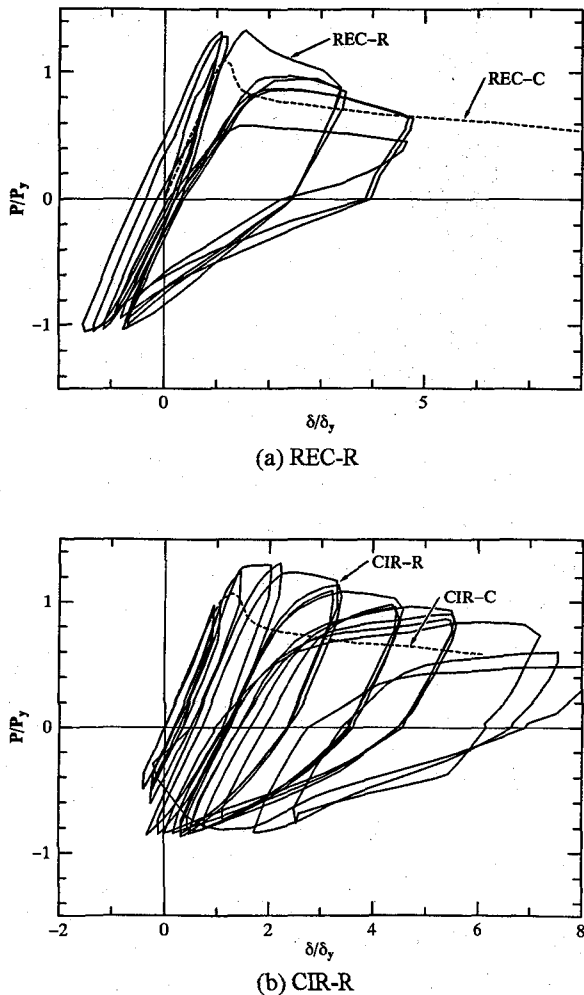


Fig. 11 Hysteresis Curve for Repeated Loading

この割合は P_y の比較とほぼ同じである。すなわち、 P_u / P_y の値は両者はほとんど等しく、鋼管柱の強度増は素材の強度が大きいことによるものといえる。また、断面平均強度 P_u / A は、鋼管柱部材 (CIR) の方が約 24% 大きかった。

3.8 エネルギー吸収能力

吸収エネルギーは、文献 11), 12) と同様、荷重－変位履歴曲線の各サイクルごとのループの面積と定義する。静的载荷では、Fig. 12 (a) に示すように、最大荷重から荷重が低下し始め、降伏荷重 P_y まで低下したときを破壊とみなし、この時の変位を最大許容変位 δ' とし、変位が δ' に達するまでの面積を吸収エネルギー AE とした。繰返し载荷では、Fig. 12 (b) に示すように、各サイクルのループ内の面積のうち、圧縮側のみの吸収エネルギーを求め、これを AE とし、AE を曲線が横軸と交わる点の変位の差 $\Delta\delta$ で除した値 (Fig. 12 (b) の斜線部分の平均高さ) を、各サイクルごとの単位変位あたりの吸収エネルギー AEUD とした。図中には、各サイクルの圧縮最大荷重が繰返し载荷供試体の最大荷重より低下し始め、降伏荷重 P_y を下回る前のサイクルを破線で示す。

静的载荷、繰返し载荷はいずれも $P / P_y - \delta / \delta_y$ 関係を用いているので、吸収エネルギーは基本エネルギー $P_y \delta_y = 2U_y$ (U_y : 弾性域における吸収エネルギー) の倍率で表されている。よって理論弾性域では 0.5 となる。このようにして求めた静的载荷供試体のエネルギー吸収能力を Table 6 に示す。また Table 7 に繰返し载荷供試体の各サイクルの累積エネルギー吸収量および単位変位あたりの吸収エネルギーと荷重サイクル数の関係を示す。

Table 6 より矩形断面の静的载荷では、引張载荷の方が圧縮载荷よりエネルギー吸収能力が約 20 倍も大きい。また、Fig. 7 より $\delta / \delta_y = 10$ まででは約 2 倍大きい。これは、圧縮载荷の場合、早期にフランジが座屈して荷重が最大荷重後すぐに低下して P_y 以下になったためである。また、圧縮载荷では円形断面の方が矩形断面よりもやや吸収エネルギーが大きかった。この理由は、前述 3.4 のとおりである。

くり返し载荷における吸収エネルギーと荷重サイクル数の関係を Fig. 13 に、単位変位あたりの吸収エネ

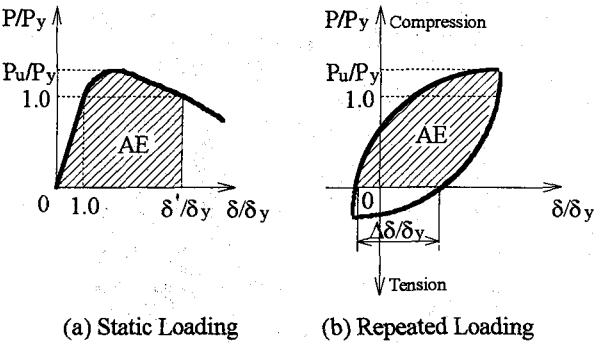


Fig. 12 Definition of Absorbed Energy

ギーと荷重サイクル数との関係を Fig. 14 に示す。Fig. 13 より、CIR-R は累積エネルギーが 18 サイクル目で基本エネルギーの約 28 倍にも達し、REC-R は 9 サイクル目で基本エネルギーの約 16 倍に達した。このことから、前述 3.6 と同様、円形断面の方が繰り返し载荷に対してはねばり強いといえる。

Fig. 14 より、エネルギー吸収率は REC-R と CIR-R ではいずれも 4 サイクル目で最大になり、以降サイクル数の増加に伴い徐々に減少する傾向が見られた。特に、CIR-R では 9 サイクル目までエネルギー吸収率は REC-R よりも約 30% 大きかった。これは、鋼構造物に一般的に使用されている鋼管の r/t (径厚比) は 50 程度であるが、本実験ではそれより肉厚の大きな r/t が約 30 の鋼管を使用したためであると考えられる。今後は、 r/t が大きく規模の大きな供試体の実験が必要であろう。

4 まとめ

本研究は断面性能のほぼ等しい矩形、円形および八角形断面を有するラーメン隅角部柱部材の単調およびくり返し载荷時の荷重-変位特性の違いを実験的に調べた研究のうち、矩形および円形断面柱に関する結果を述べたものである。各断面については、特に矩形断面の幅厚比が大きいなど寸法パラメータに限りがあるため実験結果は一般的性質を与えるものではないが、将来のデータベースの一部をなすものとして利用されよう。

本研究の結果から得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 矩形断面 (REC) の静的圧縮载荷と静的引張载荷の比較の結果、荷重-変位特性に大きな違いが現れ、引張载荷の方が大きな変位能力が得られた (Fig. 10 参照)。これは本研究で用いた試験体のフランジ幅厚比パラメータが $R=0.79$ とかなり大きく、一般的な、より小さい幅厚比の場合には、両者でほぼ同程度の変位能力が期待できると思われる。
- (2) 矩形断面柱の繰り返し载荷の場合、圧縮载荷の 1 サ

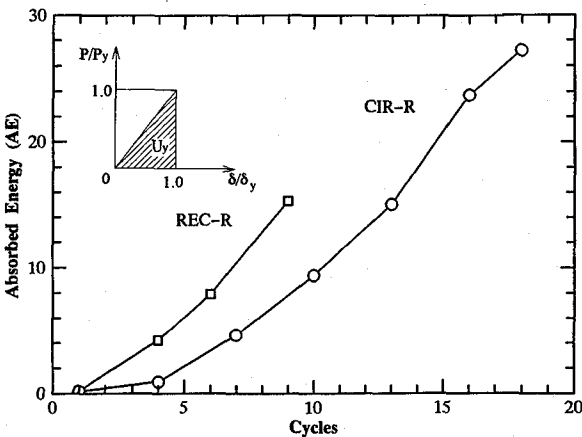


Fig. 13 Absorbed Energy per Unit Displacement

イクル目と静的圧縮载荷の最大荷重と同じ荷重になり、4 サイクル目に静的载荷の約 1.2 倍の最大荷重 (80.5tf) を得た。これは、圧縮载荷のとき内側フランジに早期に座屈が生じたものの、繰り返し载荷では、引張载荷のときに変形がもとに戻され、またひずみ硬化の影響などによって強度の上昇があったためと考えられる。

(3) 円形断面柱の繰り返し载荷の場合、繰り返しによる耐力の低下は矩形断面柱部材より小さく、ねばり強い変形特性が見られた。これは、本供試体の径厚比 r/t が約 30 とやや小さなものを使用したためと思われる。

(4) 静的载荷におけるエネルギー吸収能力を計算したところ、圧縮载荷では円形断面の方が矩形断面よりもやや吸収エネルギーが大きいことがわかった。

(5) 累積吸収エネルギーは、矩形断面の方が少ないサイクル数で大きくなったが、エネルギー吸収率は矩形断面

Table 6 Absorbed Energy ($U/P_y\delta_y$) for Static Loading

Specimen	AE
REC-C	0.84
REC-T	15.62
CIR-C	0.97

Table 7 Absorbed Energy for Repeated Loading

Cycles	REC-R		CIR-R	
	AE	AEUD	AE	AEUD
1 ($1\delta_y$)	0.21	1.02	0.18	0.97
4 ($2\delta_y$)	4.24	1.09	0.91	1.33
7 ($3\delta_y$)	10.70	0.76	4.63	1.17
10 ($4\delta_y$)	-	-	9.38	1.01
13 ($5\delta_y$)	-	-	15.01	0.89
16 ($6\delta_y$)	-	-	23.71	0.72

AE : Cumulative Absorbed Energy

AEUD : Absorbed Energy per Unit Displacement

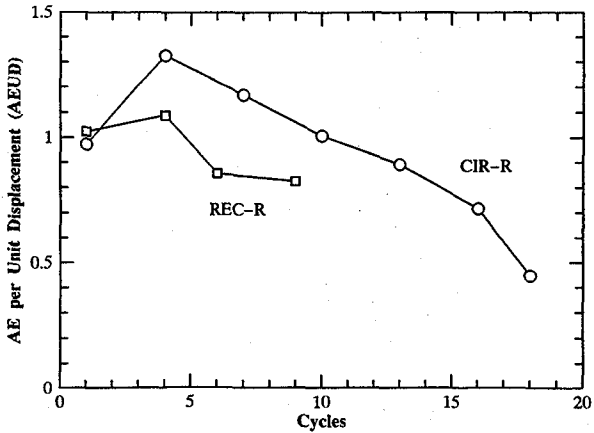


Fig. 14 Absorbed Energy per Unit Displacement Nondimensionerized by Nominal Value

よりも円形断面の方が大きいので、円形断面柱を用いた構造物は優れた耐震性を持っていると考えられる。

5 おわりに

本実験に使用した実験支持装置の製作費の一部には日東学術財団の研究助成金を当てた。供試体製作費の一部に、土木学会からの奨学寄付金を用い、製作に当たっては瀧上工業㈱の協力を頂いた。ここに以上の方に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中井 博、福岡 悟、酒造敏廣、明橋克良：鋼製ラーメン隅角部の Shear lag と耐荷力とに関する実験的研究；構造工学論文集 Vol. 33A, pp.193-206 / 1987 年 3 月。
- 2) 酒造敏廣、事口寿男：鋼製ラーメン隅角部の崩壊性状と変形性能に関する実験的研究；構造工学論文集 Vol. 37A, pp.121-134 / 1991 年 3 月。
- 3) 黄 元燮、西村宣男、高津秀俊：鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と変形能に関する実験的研究；構造工学論文集 Vol. 40A, pp.201-214 / 平成 5 年 3 月。
- 4) 山田尚之、青木徹彦：鋼製八角形断面柱を有するラーメン隅角部の静的および繰り返し強度特性に関する実験的研究；構造工学論文集 Vol. 42A, pp.197-205 / 1996 年 3 月。
- 5) 中井 博、酒造敏廣、橋本良之：せん断遅れ現象を考慮した鋼製ラーメン隅角部の限界状態設計法について；土木学会論文集 No. 455 I-21, pp.95-104 / 1992 年 10 月。
- 6) 東郷幹生、松本憲文：鋼製橋脚の柱の有効幅に関する一考察；佐藤鉄工技報, pp.17-23 / 平成 6 年 10 月。
- 7) 木暮 深、増井 隆、宇都宮紳三：鋼製円形橋脚の隅角部に関する実験的研究 (その 1) -静的載荷実験-；土木学会第 48 回年次学術講演会概要集 第 1 部 I-455, pp.1058-1059 / 平成 5 年 9 月。
- 8) 木暮 深、増井 隆、田中祐人：鋼製円形橋脚の隅角部に関する実験的研究 (その 2) -曲げ・せん断破壊実験-；土木学会第 48 回年次学術講演会概要集 第 1 部 I-456, pp.1060-1061 / 平成 5 年 9 月。
- 9) 宇都宮紳三、西村宣男：鋼製ラーメン隅角部の耐荷力と変形性能に関する実験的研究；土木学会第 47 回年次学術講演会概要集 第 1 部 I-55, pp.286-287 / 平成 4 年 9 月。
- 10) 中井 博、河井章好、北田俊行、酒造敏廣、吉川 紀：鋼製高橋脚の設計上の諸問題；橋梁と基礎 Vol.17, No.2 pp.28-35 / 1983 年 2 月。
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 / 平成 2 年 2 月。
- 12) 宇佐美勉、今井康幸、青木徹彦、伊藤義人：繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究；構造工学論文集 Vol.37A, pp.93-106 / 1991 年 3 月。
- 13) 宇佐美勉、坂野 茂、是津文章、青木徹彦：鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響；構造工学論文集 Vol.39A, pp.235-247 / 1993 年 3 月。
- 14) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 / 平成 2 年 2 月。
- 15) 土木学会：座屈設計ガイドライン, pp.321 / 昭和 62 年 10 月。

(1996 年 9 月 6 日受付)